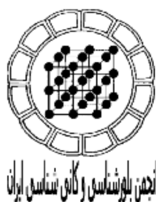
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

مقاله پژوهشی



سال سی ام، شمارهٔ چهارم، زمستان ۱۴۰۱، از صفحهٔ ۵۸۳ تا ۵۹۸

کانی‌سازی، زمین‌شیمی و ریزدماسنجی میانبارهای سیال در منطقه اکتشافی سیاجک، جنوب زاهدان، ایران

محسن هیبت‌نژاد[1]، آزاده ملکزاده شفارودی*[2]، سمانه نادرمزرجی[3]

۱-گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷، نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۲/۴)

چکیده: منطقه سیاجک در پهنه جوش‌خورده سیستان و در جنوب زاهدان قرار دارد. واحدهای سنگی منطقه شامل واحدهای دگرگونی، رسوبی و توده‌های نفوذی است. واحد آمفیبولیت بیشترین گسترش را دارد. مهم‌ترین دگرسانی‌های منطقه سیلیسی و پروپلیتی هستند. کانی‌سازی در قالب رگچه کوارتز+کالکوپیریت+پیریت و رگه کوارتز+گوتیت در سنگ میزبان آمفیبولیت با راستای شمال غربی-جنوب شرقی و شرقی- غربی دیده می‌شود. کالکوپیریت و پیریت کانی‌های اولیه و کوولیت، کالکوسیت، مالاکیت، آزوریت، هماتیت و گوتیت کانی‌های ثانویه هستند. براساس نتایج تجزیه زمین‌شیمی، بالاترین مقدار مس ۳/۲ درصد، سرب و روی به ترتیب ۲۱۸ و ۱۵۰ گرم در تن و طلا ۱۷۴ میلی‌گرم در تن است. بر اساس بررسی‌ها، میانبارهای سیال دارای دمای همگن شدگی ۳۰۰-۱۶۳ درجه سانتی‌گراد هستند و از محلولی شامل NaCl با درجه شوری ۱۳٫۵-۱۰ درصد وزنی تشکیل شده‌اند. کاهش دما مهم‌ترین عامل ته‌نشست کانی‌های سولفیدی است. بر پایه دما و شوری محلول کانه‌دار، کنترل ساختاری کانی‌سازی، نوع دگرسانی و گسترش آن و کانی‌شناسی ساده، منطقه سیاجک از نوع مس رگه‌ای است.

واژه‌های کلیدی: *کانی‌سازی؛ زمین شیمی؛ میانبارهای سیال؛ سیاجک؛ پهنه جوش‌خورده سیستان.*

مقدمه

منطقه اکتشافی سیاجک در پهنه جوش‌خورده سیستان (شرق ایران) و در ۲۰ کیلومتری جنوب زاهدان واقع شده است. پهنه زمین‌درز سیستان از زیر رده‌بندی‌های زمین‌شناسی شرق ایران به‌شمار می‌رود [1]. این پهنه از اواسط کرتاسه دستخوش گروهی از رخدادهای زمین‌شناختی مهم، ولی کوتاه مدت شده به‌طوری که بازشدگی اواسط کرتاسه باعث جدایی قطعه لوت و افغان، گسترش اقیانوس بینابینی و نهشته شدن رسوب‌های دریایی ضخیمی شده است. حجم بالای افیولیت‌ها و آمیزه‌های افیولیتی در پهنه زمین‌درز سیستان نیز شاهدی از یک پوسته اقیانوسی هستند. فرورانش این اقیانوس در ائوسن و پیش از آن باعث ایجاد سنگ‌های آذرین نفوذی و خروجی در بخش‌هایی از این پهنه شده است. سپس در اواسط ائوسن، برخورد این اقیانوس با قطعه‌های لوت و افغان به توده‌های گرانیتی متعددی چون گرانیتوئید زاهدان منجر شده است. هم‌گرایی قطعه‌های لوت و افغان پس از برخورد باعث چین‌خوردگی و گسل-خوردگی راستالغز مزدوج و فعالیت‌های ماگمایی متنوع در الیگوسن و میوسن شده است [2].

فلیش‌ها و مجموعه‌های افیولیتی گسترده‌ترین سنگ‌های این پهنه هستند. افزون بر این، سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی با ترکیب اسیدی تا بازیک در این پهنه گسترش زیادی دارند که می‌توان به باتولیت زاهدان، کوه لار، کوه ملک سیاه

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۱۱۹۲۱۳۲، نمابر: ۸۷۹۷۲۷۵-۰۵۱۳، پست الکترونیکی: shafaroudi@um.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.1.1]

[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.583]

کوه، کوه آساگی، کوه سیاستراگی و کوه جانجا و کوه تفتان اشاره کرد که از شمال تا جنوب پهنه جوش‌خورده سیستان به‌صورت پراکنده رخنمون دارند [۳]. تشکیل و تکامل حوضه رسوبی این پهنه از دیرباز مورد توجه زمین‌شناسان بوده است به‌طوری که تکامل آن از شکسته شدن خرده قاره لوت- هلمند در زمان کرتاسه در نظر گرفته شده و تشکیل یک حوضه اقیانوسی در بین آن‌ها مورد تأکید بوده است [۱]. در پی رویدادهای کافتش، فرورانش، برخوردی و پسابرخوردی و فرآیندهای ماگمایی و گرمابی وابسته به آن‌ها در پهنه جوش-خورده سیستان، کانی‌زایی‌های فراوانی در این پهنه پدید آمده‌اند که می‌توان به کانسارهای چهل کوره [۴]، لونکا [۵]، سیاه‌جنگل [۶]، خارستان [۷]، کانسار استیبنیت- طلا شورچاه [۸]، کرومیت بندان [۹]، گرانیتوئیدی کوه گراغه [۱۰] و آذرین لار [۱۱] اشاره کرد. تاکنون بررسی دقیق علمی پیرامون کانی‌سازی مس و طلا در منطقه اکتشافی سیاجک انجام نشده است. از این‌رو در این پژوهش، پس از ارائه مطالبی در رابطه با زمین‌شناسی منطقه، نتایج بررسی‌های میکروسکوپی برای تعیین ویژگی‌های کانی‌سازی، نتایج زمین شیمی برای شناسایی عناصر، نتایج بررسی میانبارهای سیال برای تشخیص عوامل تشکیل کانسار و سرانجام مدل و چگونگی تشکیل کانسار بیان می‌شود.

زمین‌شناسی

منطقه سیاجک در ورقه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ زاهدان در پهنه زمین‌ساختی سیستان واقع است [۱۲]. حوضه فلیشی شرق ایران از جمله فروگسست‌های نوع تتیس جوان است. این پهنه دارای مراحل تکوینی از پوسته اقیانوسی تا قاره‌ای است [۱، ۱۳]. پهنه زمین‌ساخت سیستان را می‌توان به سه بخش اصلی تقسیم نمود. بخش اول دربردارنده مجموعه نه در غرب بوده که شامل فلیش‌های کرتاسه پایانی تا ائوسن و افیولیت است. بخش دوم دربردارنده مجموعه رتوک در شرق بوده که شامل فلیش‌های کرتاسه و سنگ‌های افیولیتی به همراه آمیزه-های دگرگونی است. بخش سوم دربردارنده حوضه سفیدآبه است که به‌صورت ناپیوسته بر مجموعه‌های نه و رتوک قرار دارد و شامل رسوب‌های دگرگون نشده پیش کمان ماستریشین تا ائوسن است [۱].

نتیجه فرورانش ماستریشتین تشکیل سنگ‌های آتشفشانی کلسیمی-قلیایی پالئوسن-ائوسن در این حوضه است. از نظر پایان فرورانش، ماگماهای کلسیمی-قلیایی پس از ائوسن میانی اغلب برآمده از ذوب گوشته بالایی هستند. گسترش بیشتر منشورهای فزاینده و سنگ‌های دگرگونی در بخش شرقی حوضه فلیشی و برونزدهای کلسیمی-قلیایی پالئوسن-ائوسن از دلایلی هستند که اشاره به فرورانش قطعه لوت زیر قطعه افغان دارند. آتشفشانی‌های بخش شمالی آن از نوع دوگانه هستند و سن آن‌ها از شرق به غرب کم می‌شود. از این‌رو می‌توان یک فرورانش دو سویه را برای زمین‌درز شرق ایران پیشنهاد نمود [۱۴].

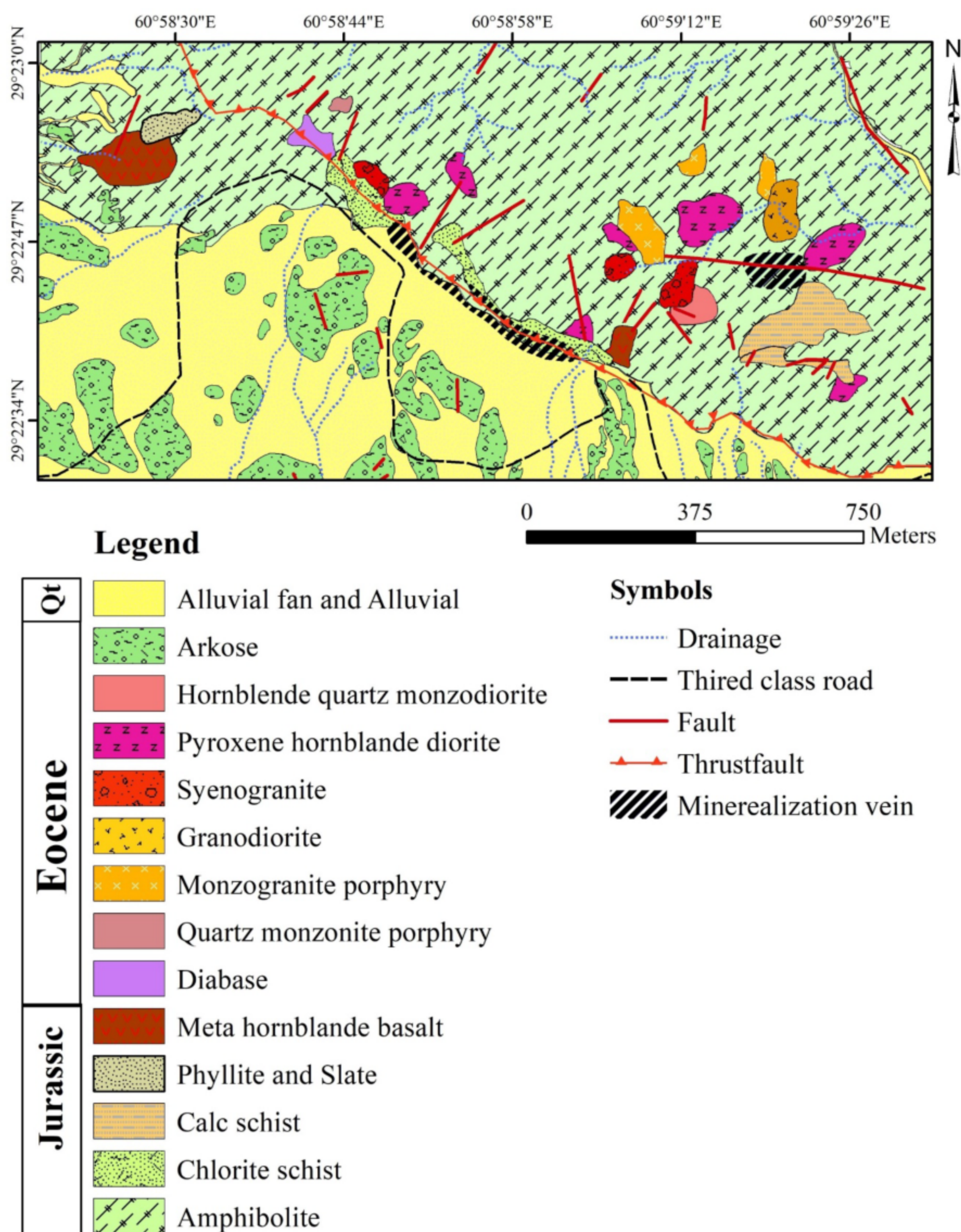
این پهنه مجموعه‌ای از بلندی‌ها و فرونشت‌هاست که گسل‌هایی با روند شمالی- جنوبی ساختارهای اصلی آن را می-سازند. دو گسل نهبندان و هریرود مرزهای شرقی و غربی این منطقه را نمایان کرده‌اند [۱۵]. در پهنه فلیش شرقی، قدیمی-ترین رخنمون‌ها مربوط به سنگ‌های کرتاسه پسین است. سری ضخیمی از رسوب‌های فلیشی کرتاسه پسین-پالئوسن همراه با فعالیت آتشفشانی زیردریایی در حوضه‌های شرقی ایران گسترش می‌یابند، به‌طوری‌که فلیش‌های ائوسن در طول کمربندهای زابل-بلوچ و مکران به‌طور دگرشیب، توالی‌های آمیزه افیولیتی را می‌پوشانند. توده‌هایی از نفوذی‌های گرانودیوریتی ائوسن پسین در این پهنه یافت شده‌اند [۱۲]. همچنین قطعه‌هایی از مواد مشابه در قطعه‌های کنگلومرای جوان‌تر، در حوضه فلیشی زابل-بلوچ دیده شده است. این شواهد، نشان‌دهنده بسته شدن حوضه‌های اقیانوسی و فرورانش این پوسته به زیر پوسته قاره‌ای است [۱۶].

براساس بازید صحرایی و بررسی‌های آزمایشگاهی، حجم عمده سنگ‌های رخنمون یافته در منطقه اکتشافی سیاجک، به سه دسته واحدهای دگرگونی، رسوبی و توده‌های نفوذی تقسیم می‌شود (شکل ۱).

براساس نقشه زمین‌شناسی-کانی‌سازی منطقه سیاجک (شکل ۱)، می‌توان گفت که سنگ‌های آمفیبولیت با ساخت توده‌ای بیشترین گسترش را دارند و در بخش‌های مرکزی تا شمال منطقه دیده می‌شوند. در بازدید صحرایی، این واحد به رنگ سبز تیره دیده شد. همچنین در بررسی های میکروسکوپی، واحد آمفیبولیت بیشتر دارای بافت نخ شکفتی بود. از جمله کانی‌های تشکیل‌دهنده این واحد می‌توان به هورنبلند و پلاژیوکلاز اشاره کرد. البته کانی هورنبلند به اکتینولیت، ترمولیت و اپیدوت تبدیل شده است. به احتمال

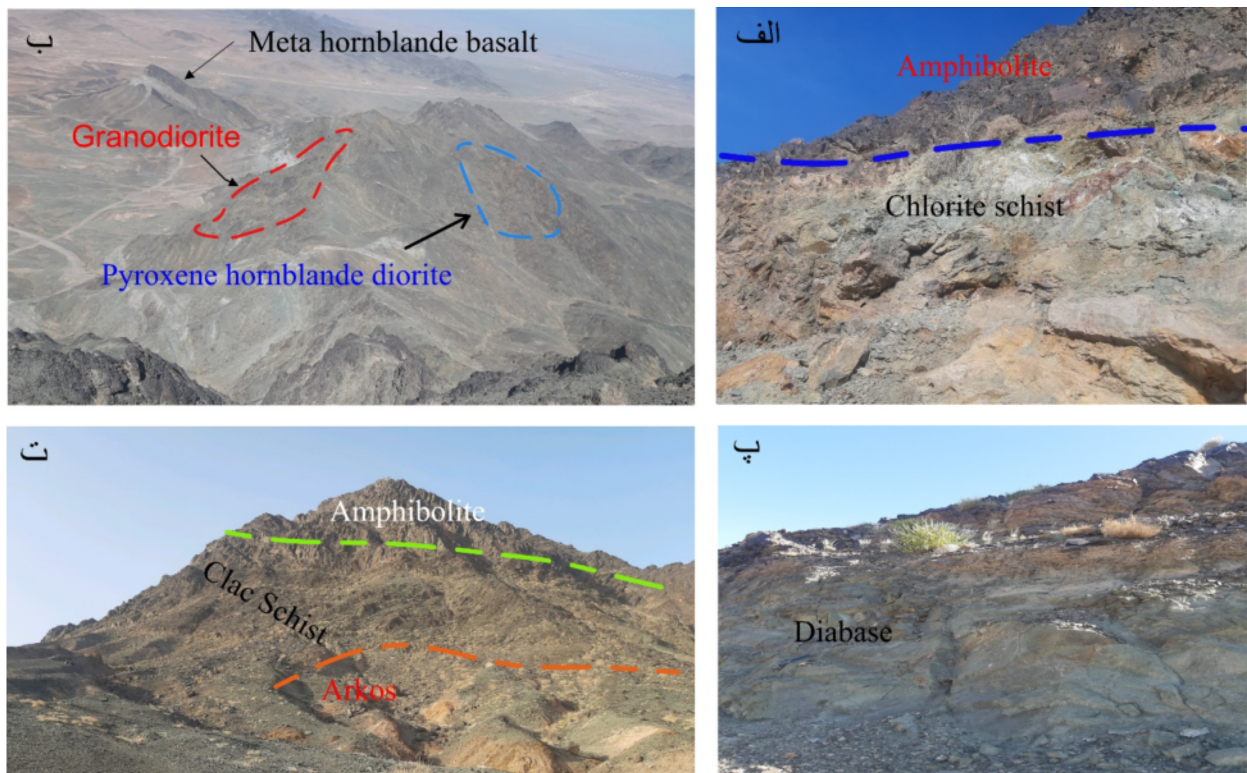
[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.1.1]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.583]

بسیار سنگ مادر این واحد، واحد آتشفشانی با ترکیب بازالتی بوده است. در بخش شرق منطقه مورد بررسی، واحد شیست آهکی رخنمون دارد که در بازدیدهای صحرایی به رنگ قهوه‌ای و در بررسی‌های میکروسکوپی با بافت شیستوارگی دیده می‌شود. در بخش‌های مرکزی منطقه، واحد سنگی کلریت شیست دیده گردید، به دلیل حضور کانی کلریت، این واحد در بازدیدهای صحرایی به رنگ سبز دیده شد (شکل۲ الف).



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی-کانی‌سازی منطقه اکتشافی سیاجک.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.1.1]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.583]



شکل ۲ تصاویر صحرایی از واحدهای سنگی منطقه اکتشافی سیاجک: الف) رخنمون‌های واحد سنگی آمفیبولیت (رنگ سفید)، کلریت شیست (رنگ سیاه) دید به سمت شمال، ب) متا هورنبلند بازالت (رنگ سیاه)، گرانودیویت (رنگ قرمز)، پیروکسن هورنبلند دیوریت (رنگ آبی) دید به سمت شرق، پ) دیاباز (رنگ سیاه) دید به سمت غرب، ت) رخنمون واحد کالک‌شیست آهکی (رنگ سیاه)، آرکوز (رنگ قرمز)، دید به سمت شمال

واحد دگرگونه هورنبلند بازالت در شمال‌غرب و در کنار اسلیت-فیلیت رخنمون دارد. بافت اصلی آن پورفیری و بادامی است که کانی‌های اصلی هورنبلند، اولیوین، پلاژیوکلاز، پیروکسن در این نمونه شناسایی شده‌اند. دیگر سنگ‌های دگرگون‌شده اسلیت و فیلیت هستند که رخنمون‌های کوچکی دارند (شکل ۱). سنگ خاستگاه این دسته از سنگ‌های دگرگونی می‌تواند سنگ‌های رسوبی غنی از کانی‌های رسی باشد. این واحد دارای رنگ هوازده سبز تیره تا خاکستری تیره است.

واحدهای نفوذی در منطقه به دو شکل عمیق و نیمه‌عمیق هستند. واحدهای سنگی نفوذی نیمه عمیق گسترش بیشتری نسبت به واحدهای نفوذی عمیق دارند. واحدهای نفوذی عمیق خاکستری متمایل به قهوه‌ای‌رنگ منطقه شامل سینوگرانیت، پیروکسن هورنبلند دیوریت و هورنبلند کوارتز مونزودیوریت هستند. واحد سینوگرانیت بیشتر در مرکز و شرق منطقه رخنمون دارد که بافت اصلی آن دانه ای است و در آن کانی-های کوارتز، ارتوکلاز و پلاژیوکلاز شناسایی شده‌اند. این واحد به رنگ خاکستری مایل به قهوه‌ای دیده می‌شود. واحد پیروکسن هورنبلند دیوریت با رنگ سبز بیشتر در مرکز و شرق منطقه مورد بررسی دیده می‌شود که بافت اصلی آن دانه ای بوده و از کانی‌های پیروکسن، هورنبلند، پلاژیوکلاز تشکیل شده است (شکل ۲ ب). در بخش شرق منطقه، کوچک‌ترین رخنمون واحدهای نفوذی واحد هورنبلند کوارتز مونزودیوریت است که به رنگ خاکستری مایل به سبز روشن دیده می‌شود و بافت اصلی آن دانه ای بوده و شامل کانی‌های هورنبلند، کوارتز، پلاژیوکلاز و ارتوکلاز است.

از واحدهای نفوذی نیمه عمیق منطقه می‌توان به دیاباز، کوارتز مونزونیت پورفیری، مونزوگرانیت پورفیری و گرانودیوریت پورفیری اشاره کرد. واحد دیابازی با بافت اصلی ریزدانه ای و نیمه پوست ماری در شمال‌غرب منطقه رخنمون دارد (شکل ۲ پ). این واحد در کنار واحد کلریت شیست به رنگ سبز روشن دیده می‌شود و کانی‌های اصلی آن، پلاژیوکلاز

و کلینوپیروکسن هستند. واحد کوارتز مونزونیت پورفیری در شمال منطقه و با مساحت تقریبی ۵۰۰ متر مربع رخنمون دارد (شکل ۱). بافت اصلی آن پورفیری با زمینه متوسط دانه است و کانی‌های تشکیل‌دهنده آن کوارتز، پلاژیوکلاز و ارتوکلاز هستند. واحد مونزوگرانیت پورفیری با بافت پورفیری در شرق منطقه و در کنار پیروکسن هورنبلند دیوریت بیرون‌زدگی دارد و کانی‌های کوارتز، ارتوکلاز و پلاژیوکلاز تشکیل‌دهنده‌های اصلی آن هستند. واحد گرانودیوریت پورفیری با بافت پورفیری در بخش شرق و کنار مونزوگرانیت پورفیری با مساحت ۷۰۰ متر مربع رخنمون یافته است. این واحد در صحرا به رنگ خاکستری دیده می‌شود. کانی‌های تشکیل‌دهنده آن کوارتز، ارتوکلاز و پلاژیوکلاز هستند.

دسته سوم از واحدهای سنگی در منطقه اکتشافی سیاجک واحدهای رسوبی به‌ویژه ماسه‌سنگ با ترکیب آرکوز است که در بخش جنوب و غرب با سن ائوسن و گسترش قابل‌ملاحظه رخنمون دارد و کانی‌های آواری آن فلدسپات و کوارتز هستند (شکل ۲ ت).

روش بررسی

برای شناسایی ماهیت کانی‌سازی در منطقه اکتشافی سیاجک، بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام شد. در بخش صحرایی، همه ویژگی‌های ساختی، بافتی و چگونگی ارتباط پدیده‌ها بررسی گردید. به‌منظور بررسی‌های سنگ‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی در این منطقه، تعداد ۴۴ مقطع نازک، ۱۴ مقطع نازک صیقلی و ۱۲ قطعه صیقلی از واحدهای سنگی و رگه‌های کانی‌سازی (از سطح و ترانشه‌ها) تهیه شد. سرانجام نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۰۰۰ با استفاده از نرم‌افزار GIS رسم گردید. بررسی زمین شیمی رگه‌های کانی‌سازی با برداشت ۱۹ نمونه خرده‌سنگی (از سطح و ترانشه‌ها)، آماده‌سازی آن‌ها با تیزآب سلطانی و تجزیه به روش طیف-سنجی نشری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) برای ۳۶ عنصر از جمله مس، سرب، روی در آزمایشگاه زرآزما انجام شد. تعداد ۱۹ نمونه برای طلا با روش عیارسنجی گرمایی در آزمایشگاه نامبرده تجزیه شدند. ۵ نمونه از رگچه و رگه کوارتز پس از بررسی‌های دقیق (مهم‌ترین کانی باطله) برای تهیه مقطع دوبر صیقل انتخاب گردیده و در دانشگاه فردوسی مشهد مقاطع دوبر صیقل آن‌ها تهیه و بررسی میانبارهای سیال بر آن‌ها انجام شد. بررسی های میانبارهای سیال با یک دستگاه سردکننده و گرم‌کننده با دقت $\pm 1^{\circ}C$ و گستره دمایی ۱۹۰- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد، ساخت شرکت لینکام مدل THM 600 انجام شد. مقدار شوری در سامانه H_2O-NaCl با برنامه موجود شده در نرم‌افزار اکسل محاسبه شد [۱۷، ۱۸]. سپس نمودارها با نرم‌افزار SPSS رسم گردید.

دگرسانی و کانی‌زایی

دگرسانی در منطقه مورد بررسی به دو بخش لبه رگه و ناحیه-ای تقسیم می‌شود. سیلیسی شدن مهم‌ترین دگرسانی موجود در لبه رگه بوده که با شدت‌های متفاوت قابل دیده است. سیلیسی شدن به‌صورت تشکیل کوارتز دیده می‌شود. در سیلیسی شدن شدید، همه سنگ با کانی کوارتز جایگزین شده است. این دگرسانی محدود به پیرامون رگه است که همراه با اکسید آهن دیده می‌شود. دگرسانی پروپلیتی به‌صورت ناحیه‌ای است که گسترش قابل‌توجهی در منطقه اکتشافی دارد. اثر این نوع دگرسانی بر واحدهای سنگی آذرین منطقه قابل دیده است و شدت آن از ضعیف تا شدید تغییر می‌کند. دگرسانی پروپلیتی ضعیف بیشتر در مرکز و شرق منطقه اکتشافی بر واحدهای پیروکسن هورنبلند دیوریت، سینوگرانیت، هورنبلند کوارتز مونزو گابرو اثر گذاشته است. دگرسانی پروپلیتی متوسط بیشتر در واحدهای مونزوگرانیت پورفیری که اغلب در شرق منطقه رخنمون دارند، دیده می‌شود. دگرسانی پروپلیتی متوسط تا شدید که بیشترین گسترش را در منطقه اکتشافی دارد، در بخش‌های مرکزی- شمالی واحدهای آمفیبولیت، دیاباز و متاهورنبلند بازالت را دگرسان کرده است. از مهم‌ترین شاخص-های این دگرسانی، حضور کانی اپیدوت به رنگ سبز است.

براساس برداشت‌ها و پیمایش‌های صحرایی، کانه‌زایی در منطقه سیاجک درون سنگ‌های دگرگونی با ترکیب آمفیبولیت و در برخوردگاه شیست آهکی و آمفیبولیت دیده می‌شود. کانی‌سازی در منطقه اکتشافی سیاجک دارای کنترل ساختاری بوده که در راستای روند گسل‌های منطقه با راستای شمال غرب- جنوب شرق و شرقی- غربی تشکیل شده است. کانی-سازی از نوع رگه- رگچه‌های سیلیسی- سولفیدی است (شکل ۲ الف). کانی‌زایی در منطقه سیاجک به دو دسته کانی‌زایی

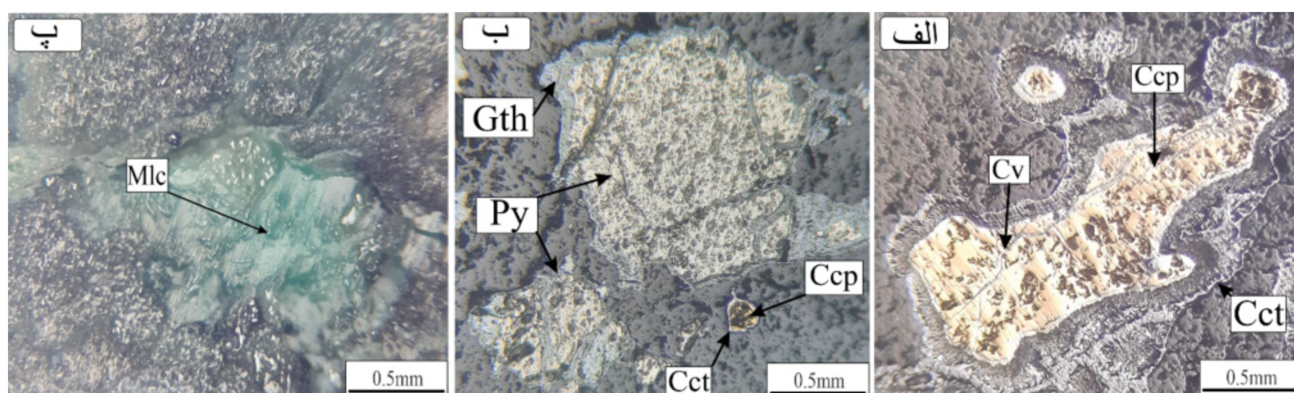
[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.1.1]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.583]

اولیه (درونزاد) و ثانویه (برونزاد) تقسیم می‌شود. کانی‌زایی اولیه اغلب به شکل کانه‌های گوگردی رخ داده است که به‌صورت پراکنده و در رگه‌های سیلیسی-سولفیدی وجود دارند. مهم‌ترین کانه‌های اولیه در منطقه سیاجک کالکوپیریت و پیریت هستند. از جمله کانی‌های ثانویه در منطقه سیاجک به ترتیب فراوانی می‌توان به مالاکیت، آزوریت، کالکوسیت و کوولیت و اکسیدهای آهن اشاره نمود. رخنمون رگه‌های معدنی در منطقه سیاجک اغلب به شکل کامل از کانی‌های سطحی و ثانویه به وجود آمده‌اند. ترانشه زدن حتی تا عمق چند متری گویای حضور کانی‌های ثانویه است، کانی‌هایی چون کربنات‌های مس شاخص پهنه هوازدگی و اکسایش هستند. با توجه به حضور کانی‌های مس دار و بقایایی از کانی‌های سولفیدی به نظر می‌رسد که نفوذ آب‌های سطحی در رگه‌های معدنی باعث انحلال و اکسید شدن سولفیدهای اولیه شده است. کانی‌سازی در منطقه مورد بررسی در قالب ساخت و بافت‌های رگچه‌ای، جانشینی ثانویه، گل کلمی و به مقدار کمتر پراکنده دیده می‌شود.

برای تفکیک انواع رگه-رگچه‌های موجود در پهنه کانی‌سازی از روابط همبرزایی و کانی نگاری بین آن‌ها استفاده شد که بر این اساس، و این رگه-رگچه‌ها به دو نوع زیر تقسیم می‌شوند: (۱) نوع اول رگچه‌های کوارتز+کالکوپیریت+پیریت با ضخامت کمتر از ۵ سانتی‌متر است. در این رگچه، حدود ۵ درصد پیریت، ۱۰ درصد کالکوپیریت و بقیه آن کوارتز است. همچنین کانی ثانویه مالاکیت وجود دارد. رخنمون رگچه‌ای به طول حدود ۱۰ تا ۳۰ متر و پهنای ۰/۵ تا ۱ متر دیده می‌شود. (۲) نوع دوم رگه-رگچه‌های کوارتز+گوتیت هستند که گسترش بیشتری نسبت به رگچه‌های دیگر دارند و بیش از ۷۰ درصد از کوارتز شیری رنگ تشکیل شده‌اند. در این رگه-رگچه‌ها، کانی‌های کالکوپیریت و پیریت به‌صورت پراکنده دیده می‌شوند. ضخامت آن کمتر از ۱۰ سانتی‌متر است.

کانی‌شناسی

کالکوپیریت: کالکوپیریت به‌صورت پراکنده و پرکننده فضای خالی و در رگچه‌ها با توزیع بسیار کم (کمتر از ۱۵-۱۰ درصد حجمی) همراه با کوارتز دیده می‌شود (شکل ۳ الف). کالکوپیریت در منطقه در رگچه‌های سیلیسی-سولفیدی دیده می‌شود. در تصاویر میکروسکوپی، این کانی به‌صورت بی‌شکل وجود دارد و اندازه آن از ۰/۱ تا ۴ میلی‌متر متغیر است. در برخی از رگچه‌ها به علت رخدادهای زمین‌ساختی و فعالیت دوباره گسل‌ها، کانی کالکوپیریت دچار شکستگی شده است. کالکوپیریت طی این شکستگی‌ها اغلب در نواحی شکستگی، به کوولیت و در لبه‌ها، به کالکوسیت با بافت جانشینی ثانویه تبدیل شده به طوری که در لبه کالکوپیریت، این کانی در حال تبدیل به کالکوسیت و گوتیت است. درنتیجه فرآیند هوازدگی، این کانی ۲۰ تا ۷۰ درصد به گوتیت، ۱۰ تا ۳۰ درصد به کالکوسیت و ۵ تا ۲۵ درصد به مالاکیت تبدیل گردیده است. این عمل سبب گسترش فرآیند اکسایش می‌شود.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از کانه‌های منطقه اکتشافی سیاجک: الف) دانه‌های پراکنده کالکوپیریت و پیریت درون کوارتز که در لبه بافت جانشینی ثانویه کالکوسیت در نتیجه اکسید شدن کالکوپیریت و پیریت دیده می‌شود، ب) جانشینی ثانویه گوتیت و کالکوسیت درنتیجه اکسید شدن کالکوپیریت و پیریت، پ) دانه‌های مالاکیت در پی جانشینی کالکوپیریت (Ccp: کالکوپیریت، Gth: گوتیت، Cct: کالکوسیت Mlc: مالاکیت Py: پیریت، [۱۹]).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.1.1]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.583]

پیریت: کانی پیریت با فراوانی کمتر در حد ۱ تا ۵ درصد همراه با کالکوپیریت در منطقه و در رگه‌های سیلیسی-سولفیدی دیده می‌شود. اندازه دانه‌های پیریت بین ۰/۵ تا ۶ میلی‌متر است. در تصاویر میکروسکوپی، پیریت به‌صورت شکل‌دار، نیمه شکل‌دار و بی‌شکل وجود دارد. پیریت در بخش کانی‌سازی رگه‌ای اغلب بین ۵ تا ۸۰ درصد به اکسیدهای آهن تبدیل شده است. در منطقه مورد بررسی اغلب پیریت به شکل افشان درون درزه‌ها و شکستگی‌ها حضور دارد. در سطح، پیریت اغلب به اکسیدهای آهن و گوتیت تبدیل شده است (شکل ۳ الف).

کالکوسیت و کوولیت: کالکوسیت و کوولیت با بافت جانشینی ثانویه از تبدیل کانی کالکوپیریت به وجود آمده‌اند و تنها همراه با رگچه‌های کالکوپیریت اکسیده دیده می‌شوند. آثار کالکوپیریت گاهی در بین کالکوسیت و کوولیت به جا مانده است. از تبدیل کالکوپیریت نخست کالکوسیت و سپس کوولیت تشکیل شده است. فراوانی کالکوسیت حدود ۲-۷ درصد و کوولیت ۱-۳ درصد حجم کانی‌سازی است (شکل ۳ ب).

مالاکیت: مالاکیت از کانی‌های ثانویه کربنات آبدار مس است. مقدار مالاکیت بسته به مقدار کانی‌های سولفیدی مس موجود در رگه متفاوت است. مالاکیت فراوان‌ترین کانی ثانویه در منطقه اکتشافی سیاجک بوده که با دیگر کانی‌های ثانویه چون کالکوسیت، آزوریت و اکسیدهای آهن همراه است و به‌صورت لکه‌های پراکنده، گل گلمی و رگچه‌ای در نواحی اکسایشی و برون‌زاد دیده می‌شود. در نمونه دستی، فراوانی مالاکیت حدود ۵-۴ درصد است. این کانی برآمده از تبدیل هر کانی سولفیدی مس‌دار در منطقه است. مالاکیت در سطح رگه کانی‌سازی را تشکیل داده است و در ترانشه‌های حفر شده به رنگ سبز دیده می‌شود (شکل ۳ پ).

آزوریت: آزوریت دیگر کانی ثانویه کربناتی مس است که با فراوانی بسیار کمتر نسبت به مالاکیت همراه با این کانی و به‌صورت آغشتگی دیده می‌شود. مقدار آزوریت در نمونه‌ها بین ۱ تا ۴ درصد متغیر است. آزوریت برآمده از تبدیل کالکوپیریت است و در برخی نمونه‌ها، باقیمانده‌های از کالکوپیریت دیده می‌شود.

اکسیدهای آهن: اکسیدهای آهن توسط هوازدگی و اکسایش کانی‌های سولفیدی مس و آهن از جمله پیریت ایجاد می‌شوند. هماتیت و گوتیت از تبدیل کانی‌های سولفیدی به‌ویژه پیریت شکل گرفته‌اند. با ادامه اکسایش، گوتیت به لیمونیت تبدیل می‌شود. لیمونیت به رنگ نارنجی- زرد و هماتیت به رنگ قرمز دیده می‌شود.

اکسید منگنز: پیرولوسیت کانی اکسید منگنز ثانویه است که به رنگ خاکستری- سیاه و به شکل سنگدانه‌های دندریتی به سطح سنگ‌ها در دیواره رگه‌ها و شکستگی‌ها دیده می‌شود. گسترش نیافتن پهنه گوسان و سطحی بودن آن نتیجه عملکرد کوتاه مدت محلول‌های برون‌زاد است.

کوارتز: کانی کوارتز مهم‌ترین و فراوان‌ترین باطله در منطقه اکتشافی است. کوارتز به دو شکل سیلیسی شدن خمیره سنگ و درون رگچه‌های سیلیسی-سولفیدی دیده می‌شود. کوارتز نوع رگچه‌ای مربوط به نسل‌های جدیدتر است. ۷۵ تا ۱۰۰ درصد رگه‌های سیلیسی- سولفیدی با کوارتز پر شده‌اند و به رنگ شیری دیده می‌گردد. اندازه بلورهای کوارتز ۳۰۰-۵۰ میکرون است. ضخامت این رگه‌ها بین ۵ سانتی‌متر تا ۲ متر متغیر است. کوارتز اغلب به‌عنوان سیمان برش گسلی به شکل پرکننده فضای خالی و رگه-رگچه‌ای ایجاد شده است. دلیل رنگ شیری کوارتز حجم بالا و نبود سایر بافت‌ها در آن است.

ساخت و بافت ماده معدنی

کانی‌سازی در منطقه مورد بررسی در قالب ساخت و بافت‌های رگچه‌ای، جانشینی ثانویه، گل کلمی و به مقدار کمتر پراکنده دیده می‌شود. در ادامه ساخت و بافت‌های مهم دیده شده طی بازدیدهای صحرایی و بررسی های میکروسکوپی توصیف می-شوند:

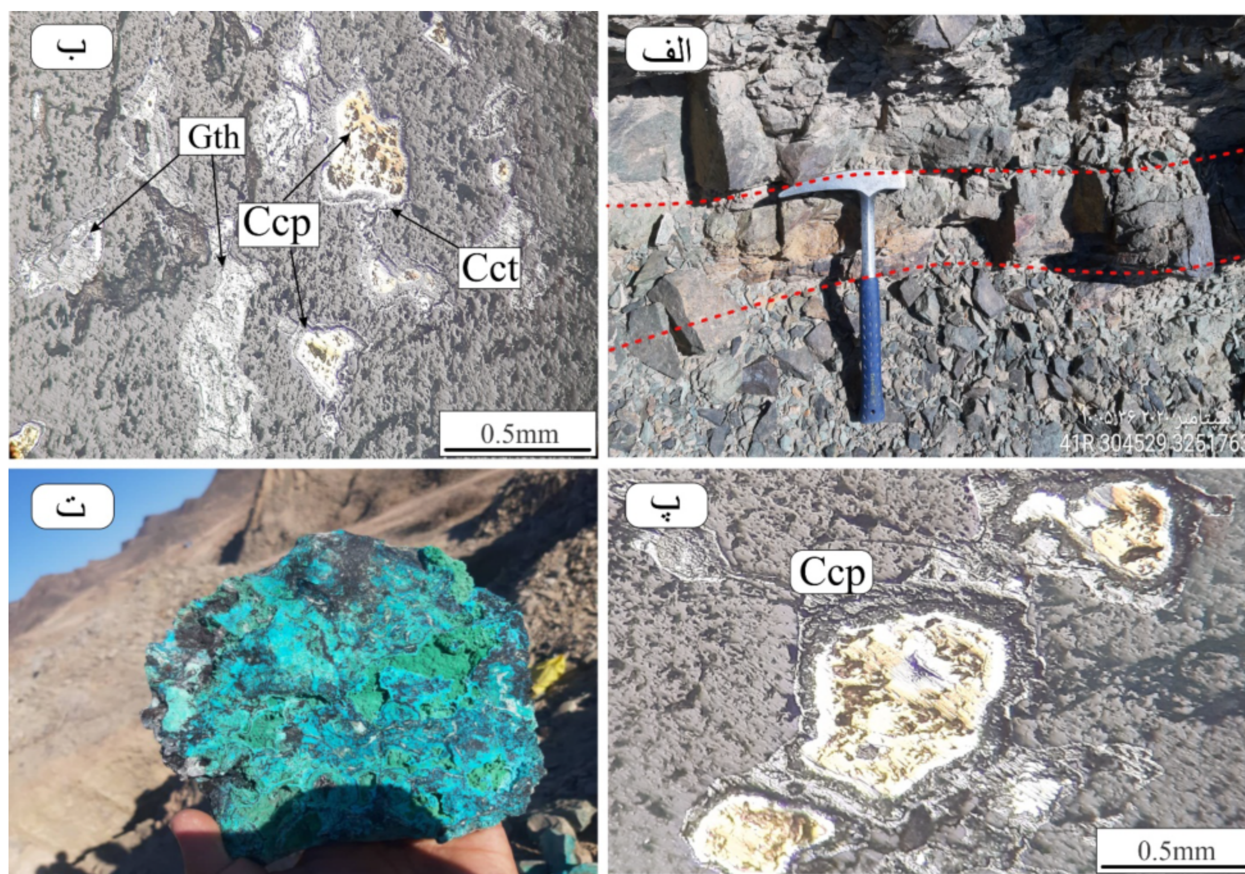
رگه – رگچه‌ای: محلول‌های ماگمایی یا گرمابی در صورتی که طی عبور از گسل‌ها، درزه و شکاف‌ها باز خود را برجای گذارند، ساخت و بافت نوع رگه – رگچه‌ای شکل می گیرد. عمده کانی زایی سولفیدی به‌صورت رگه-رگچه‌ای بوده که شامل کالکوپیریت، پیریت و سایر فراورده‌ها چون مالاکیت و اکسیدهای آن است. ضخامت این ساختارها از کمتر از ۵ میلی-متر در رگچه کوارتز+کالکوپیریت+پیریت تا ۲ متر در رگه-رگچه کوارتز+گوتیت متغیر است (شکل ۴ الف).

دانه پراکنده: بافت دانه پراکنده در سراسر کانسار دیده می‌شود. در نزدیکی رگه‌ها، این بافت درون سنگ میزبان وجود دارد. رخداد این بافت درون رگه‌ها را می‌توان مربوط به نفوذ سیال-های گرمابی به درون سنگ میزبان دانست. کانی‌های کالکوپیریت و پیریت و گاهی فراورده‌های ثانویه آن‌ها به‌صورت پراکنده تشکیل شده‌اند. کمتر از ۵ درصد حجم سنگ مربوط

به این بافت است. پیریت در این بافت به‌صورت بین دانه‌ای تا دانه‌ای پراکنده دیده می‌شود. کانی‌سازی پراکنده پیریت در بخش‌های سطحی اغلب در اثر هوازدگی به هیدروکسیدها و اکسیدهای آهن تبدیل گردیده و آثاری از کانی‌های سولفیدی بر جای می‌گذارد (شکل ۴ ب).

کلوفرم/دندریتی: این بافت بیشتر در بخش‌های اکسایشی منطقه که پیریت‌ها اغلب به گوتیت و هماتیت تبدیل شده‌اند، دیده می‌شود. بافت گل کلمی در مالاکیت و همچنین گوتیت که بر اثر هوازدگی کانی‌های سولفیدی و اکسیدهای آهن ایجاد شده است، وجود دارد. حضور این بافت در ذخایر معدنی نشانگر دمای کم محلول گرمابی است. بافت دندریتی اغلب در کانی پیرولوسیت که اکسید منگنز ثانویه است، ایجاد شده است (شکل ۴ پ).

بافت جانشینی ثانویه: واکنش محلول با کانی‌های پیشتر تشکیل شده سبب جانشینی کانی جدید در لبه کانی پیشین و یا جانشینی کامل آن می‌شود. در مورد لبه کانی، می‌توان به جانشینی کالکوسیت و کوولیت در لبه کالکوپیریت اشاره نمود. همچنین گاهی اکسیدهای آهن به‌صورت کامل به جای کالکوپیریت و پیریت قرار گرفته‌اند. اکسیدشدن سولفیدها به اکسیدهای آهن و ترکیب‌های دیگر، از نوع جانشینی محسوب می‌گردد. این بافت ناشی از تبدیل فازهای کانیایی سولفیدی دما بالا به انواع دما پایین است. کانی‌های مالاکیت، کالکوسیت و کوولیت از جانشینی کالکوپیریت تشکیل شده‌اند، به‌طوری که گاهی آثاری از کالکوپیریت‌ها در وسط کانی‌های نام برده به جا مانده است. میزان تبدیل کالکوپیریت از ۵ تا ۲۰ درصد متغیر است. پیریت نیز به کانی‌های هماتیت و گوتیت تبدیل شده که میزان تبدیل آن ۵-۱۰۰ درصد است. این بافت همچنین در شرایط هوازدگی و ایجاد کانی‌های برونزاد نیز به وجود می‌آید. جانشینی اغلب از لبه بلور شروع شده و در راستای رخ‌ها و درز و شکستگی‌ها به‌طور نامنظم ادامه می‌یابد (شکل ۴ ت).



شکل ۴ تصاویری از بافت سنگ‌ها: الف) تصویر صحرایی از بافت رگچه-رگه، ب) بافت پراکنده که در آن دانه‌های کالکوپیریت و پیریت در کوارتز دیده می‌شود، پ) بافت در گوتیت که بر اثر هوازدگی کانی‌های سولفیدی و اکسیدهای آهن ایجاد شده است، ت) بافت جانشینی ثانویه کانی مالاکیت آبی رنگ از جانشینی کالکوپیریت (Ccp: کالکوپیریت، Gth: گوتیت، Cct: کالکوسیت [۱۹]).

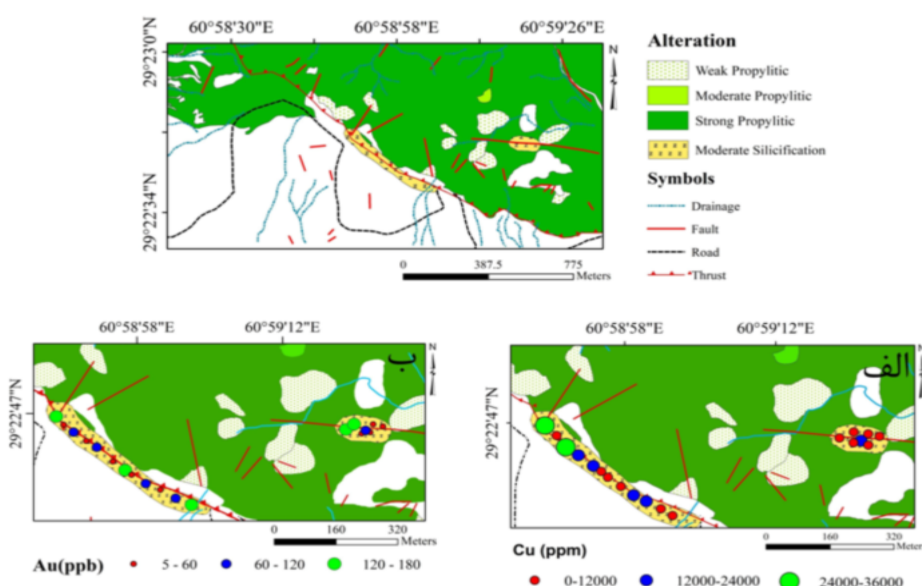
[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.1.1]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.583]

زمین شیمی

براساس نتایج تجزیه زمین شیمی، عنصر اصلی مس است. کانی‌سازی مس با دگرسانی لبه‌ای سیلیسی در مرکز منطقه اکتشافی دیده می‌شود. مس روی رگچه کوارتز+ کالکوپیریت+ پیریت و درون سنگ میزبان آمفیبولیت دیده می‌گردد. مقادیر اندازه‌گیری شده برای عیار مس در منطقه اکتشافی سیاجک از ۵۷ گرم در تن تا بیش از ۳۲۰۰۰ گرم بر تن متغیر است. نقشه ناهنجاری عناصر موجود در منطقه در شکل ۵ نشان داده شده است. براساس شکل ۵ الف، وجود مس مربوط به حضور کانی اولیه کالکوپیریت و کانی‌های ثانویه کوولیت، کالکوسیت و مالاکیت است. مقدار سرب از ۳ تا ۲۱۸ گرم در تن و روی از ۶۷ تا ۱۵۰ گرم در تن متغیر است. نتایج عیارسنجی گرمایی نشان می‌دهد که ناهنجاری طلا همراه با کانی‌سازی مس به‌صورت رگه‌ای در مرکز رگچه کوارتز+کالکوپیریت+پیریت درون سنگ آمفیبولیت و همراه با دگرسانی سیلیسی وجود دارد. عیار طلا در منطقه اکتشافی سیاجک کم و از ۵ تا ۱۷۴ میلی‌گرم در تن متغیر است (شکل ۵ ب). از عوامل حضور آهن در رگه، اکسیدهای آهن هماتیت و گوتیت بوده که مربوط به تجزیه کانی سولفیدی هستند.

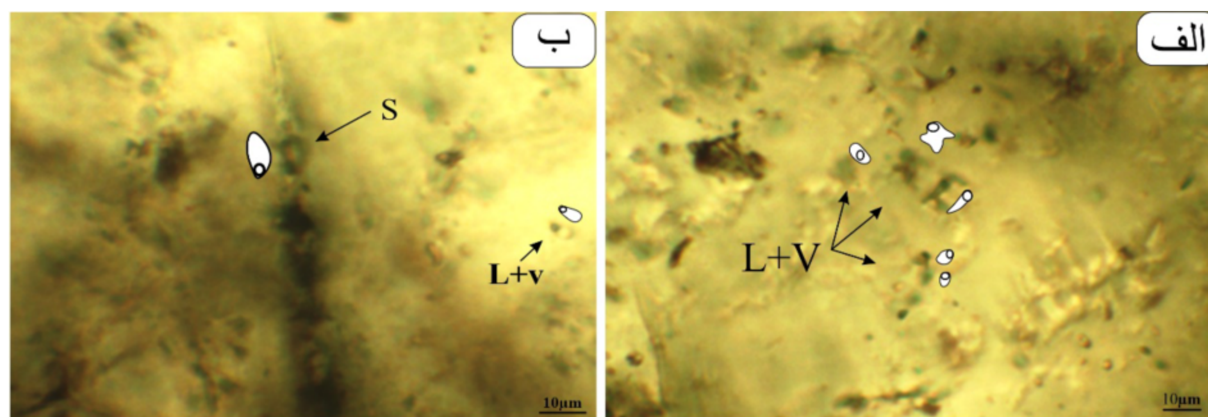
میانبارهای سیال

بررسی میانبارهای سیال نتایج مهمی از ماهیت فیزیکوشیمیایی از جمله دما و شوری محلول کانه‌دار را در اختیار می‌گذارد و از مهم‌ترین ابزارها برای تعیین خاستگاه کانسارهای گرمابی است. براساس بررسی‌های میکروسکوپی، میانبارهای سیال ثانویه و ثانویه کاذب در راستای ریزساختارها گسترش می‌یابند، در حالی که میانبارهای سیال اولیه به‌طور تصادفی درون بلورها پراکنده هستند. از نظر ریخت‌شناسی، میانبارهای سیال ممکن است به‌صورت بلورهای منفی، کروی، میله‌ای، بیضوی، مستطیلی و نامنظم دیده شوند [۲۰]. در منطقه اکتشافی سیاجک، کوارتز مهم‌ترین و فراوان‌ترین کانی غیرفلزی همراه با رگچه‌های کوارتز+کالکوپیریت+پیریت و رگه‌های کوارتز+گوتیت است. این رگه-رگچه‌ها دارای میانبارهای سیال مناسب برای تعیین دما و شیمی محلول کانه‌دار هستند. سیال درگیر برای ۵ مقطع دوبر صیقل کوارتز بررسی شد. در میانبارهای سیال در نمونه‌های منطقه اکتشافی سیاجک، شکل‌های مدور تا بی‌شکل متداول هستند و میانبارها بیشتر به صورت مخروطی، دایره‌ای و بیضوی کشیده دیده می‌شوند. بزرگ‌ترین میانبارهای سیال در منطقه، به‌صورت دو فازی غنی از مایع (L+V) هستند و طول آن‌ها به ۱۰ میکرون می‌رسد. البته بیش‌ترین اندازه آن‌ها در منطقه ۷-۵ میکرون و اندازه قطر حباب گاز در نمونه ۲-۱ میکرون است. براساس تقسیم‌بندی شپارد و همکاران [۲۱]، میانبارهای سیال در منطقه اکتشافی سیاجک از نظر تعداد فاز و فراوانی به ۴ نوع سه فازی L+V+O، دو فازی غنی از مایع (L+V)، تک فازی غنی از گاز (V) و تک فازی غنی از مایع (L) تقسیم می‌شوند (شکل ۶). در منطقه اکتشافی، میانبارهای سیال دربردارنده کانی کدر اغلب شامل هماتیت و گوتیت هستند که با رنگ قهوه‌ای ظاهر می‌شوند. هماتیت فاز اکسید آهن پایداری است.



شکل ۵ نقشه زمین شیمیایی تک عنصری عناصر موجود در منطقه سیاجک، الف) ناهنجاری تک متغیره مس ب) ناهنجاری تک متغیره طلا.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.1.1]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.583]



شکل ۶ تصاویری از میانبارهای سیال در رگچه‌های کوارتز+کالکوپیریت+ پیریت و رگه-رگچه کوارتز+گوتیت: الف) سیال درگیر اولیه در منطقه به‌صورت فازهای (L+V). ب) میانبارهای سیال ثانویه (S) در راستای شکستگی.

می‌توان نتایج ریزدماسنجی میانبارهای سیال اولیه در منطقه سیاجک در جدول ۱ آورده شده است. براساس این نتایج می‌توان گفت که دمای همگن‌شدگی برای سیال‌های درگیر نوع اولیه رگه-رگچه کوارتز+کالکوپیریت+پیریت ۱۷۵ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۲۴۵/۲ درجه سانتی‌گراد است. نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) برای این رگه-رگچه ۵۳/۶- تا ۵۲/۶- درجه سانتی‌گراد با میانگین ۵۳- درجه سانتی‌گراد است (جدول ۱). این مقادیر حضور احتمالی نمک-های NaCl و $CaCl_2$ در سیال درگیر را نشان می‌دهد. دمای ذوب آخرین بلور یخ (Tm) برای میانبارهای سیال رگچه نوع اول برابر با ۹/۶- تا ۶/۶- درجه سانتی‌گراد با میانگین ۷/۸- درجه سانتی‌گراد است. براساس سامانه H_2O-NaCl، مقدار شوری برای سیال درگیر رگچه‌های نوع اول ۱۰ تا ۱۳/۵ با میانگین ۱۱/۶ درصد وزنی نمک کلرور سدیم (NaCl) است. دمای همگن‌شدگی برای رگه-رگچه‌های نوع دوم کوارتز+ گوتیت ۱۶۳ تا ۲۳۵ درجه سانتی‌گراد با میانگین ۲۰۸/۵ درجه سانتی‌گراد است. نخستین دمای ذوب‌شدگی (T_{fm}) برای این نوع رگه-رگچه ۵۵/۴- تا ۵۲- درجه سانتی‌گراد با میانگین ۵۲/۱- درجه سانتی‌گراد است (جدول۱). این مقادیر حضور احتمالی نمک‌های $CaCl_2$ و $MgCl_2$ در سیال درگیر را نشان می‌دهد. دمای ذوب آخرین بلور یخ (Tm) برای سیال‌های درگیر این نوع رگه-رگچه ۹/۲- تا ۷- درجه سانتی‌گراد با میانگین ۷/۷- درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. براساس سامانه H_2O-NaCl، مقدار شوری برای سیال درگیر رگه-رگچه‌ای نوع دوم ۱۰/۵ تا ۱۳/۱ با میانگین ۱۱/۴ درصد وزنی نمک کلرور سدیم است (شکل ۷).

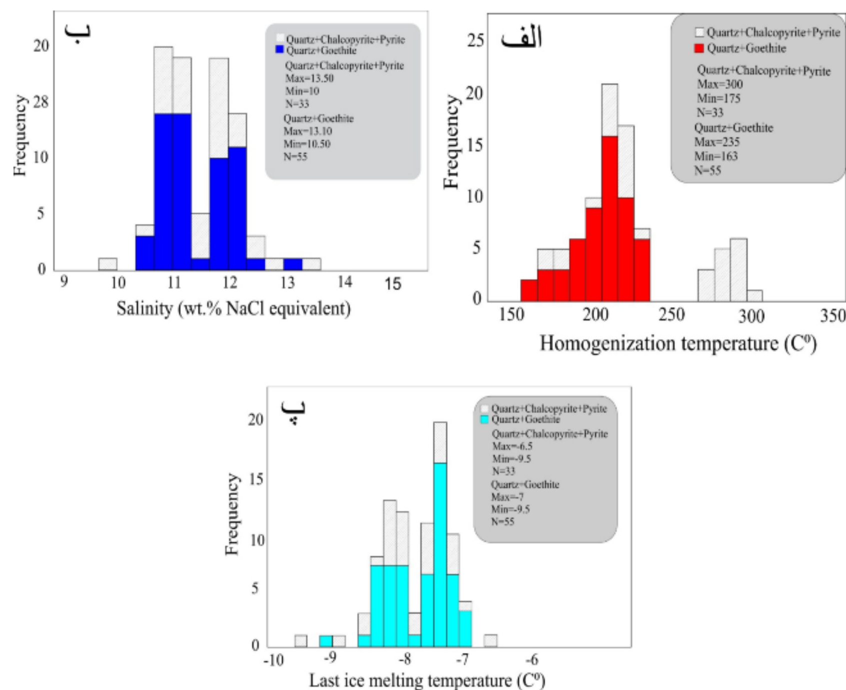
بحث

تکامل سیال کانه‌ساز

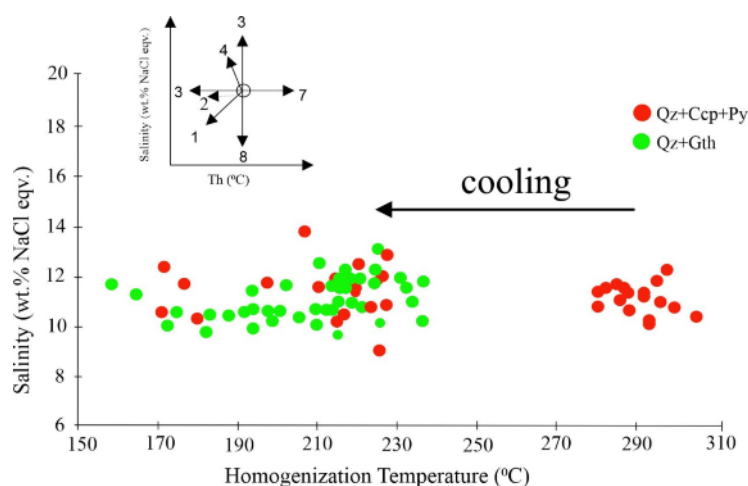
از روش‌های شناسایی جمعیت‌های مختلف میانبارهای سیال در نمونه‌های مورد بررسی در یک کانسار، استفاده از نمودارهای توزیع فراوانی داده‌های ریزدماسنجی میانبارهای سیال است. نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال منطقه سیاجک نشان‌دهنده دو رگچه با دماهای مختلف و شوری‌های مشابه بوده که در شکل‌گیری کانی‌سازی نقش داشته است. آنچه در نمودار شوری- دمای همگن شدگی برای میانبارهای سیال مورد توجه است دو دسته شدن سیال‌ها با روند خطی مستقیم است که سردشدگی سیال در اثر کاهش دما سازوکار اصلی کانه‌ساز محسوب می‌شود. به طوری که کاهش دمای سیال‌ها در نتیجه صعود سیال‌های عمقی داغ از محل شکستگی‌ها به سطح زمین رخ داده است. مجموعه‌های بی‌سولفیدی در کانسارهایی که دماهای پایین‌تر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شوند و یا در کانسارهایی که کانی‌شناسی آن‌ها گویای شرایط احیاء کننده است، غالب هستند. این در حالی است که در کانسارهایی که دماهای بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شوند و یا کانسارهایی که کانی‌شناسی آن‌ها بیانگر شرایط اکسیدکننده است، مجموعه‌های کلریدی غلبه دارند [۲۲]. دمای تشکیل کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در منطقه اکتشافی سیاجک نشان‌دهنده غالب بودن مجموعه-های بی سولفیدی و کم اهمیت بودن مجموعه‌های کلریدی است. وجود کانی‌های پیریت و کالکوپیریت در منطقه سیاجک به نوعی این مطلب را تائید می‌کند (شکل ۸).

جدول ۱ نتایج ریزدماسنجی سیال‌های درگیر اولیه دو فازی مایع - بخار (LV) در منطقه سیاجک.

ردیف	شماره مقطع	دمای همگن‌شدگی (C°)	نخستین دمای ذوب یخ (C°)	آخرین دمای ذوب یخ (C°)	شوری (NaCl wt٪)	چگالی (gr/Cm^3)
۱	۱۶۰	۱۹۵ تا ۲۲۵	-۵۳ تا -۵۰٫۲	-۷ تا -۸٫۷	۱۰٫۵ تا ۱۲٫۵	۰٫۹۲ تا ۰٫۹۶
۲	۹۰	۱۶۳ تا ۲۲۵	-۵۲ تا -۵۲٫۸	-۸ تا -۸	۱۰٫۵ تا ۱۲٫۳	۰٫۹۳ تا ۰٫۹۹
۳	۲۵	۱۷۵ تا ۲۳۰	-۵۵٫۴ تا -۵۳٫۲	-۱۰ تا -۷	۱۰ تا ۱۳٫۵	۰٫۹۱ تا ۰٫۹۹
۴	۱۷	۲۷۸ تا ۳۰۰	-۵۳٫۶ تا -۵۳	-۷ تا -۸	۱۰٫۶ تا ۱۲٫۲	۰٫۸۳ تا ۰٫۸۷
۵	۲۴	۲۱۷ تا ۲۳۵	-۵۳٫۶ تا -۵۲٫۳	-۹ تا -۷	۱۱ تا ۱۳٫۱	۰٫۹۲ تا ۰٫۹۴



شکل ۷ نمودارهای ستونی برای کانی‌سازی رگه‌ای در منطقه سیاجک: الف) دمای همگن شدگی، ب) شوری، پ) آخرین دمای ذوب یخ.



شکل ۸ نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی سیال‌های درگیر منطقه سیاجک و روندهای ممکن تکامل سیال در نمودار دما-شوری از مرجع [۲۳]، روند ۱: مخلوط شدگی سیال A با سیال سردتر و با شوری کمتر B، روندهای ۲ و ۳: مخلوط شدگی سیال A با میانبارهای سیال با شورهای مختلف ولی دمای یکسان، روند ۴: شوری فاز باقیمانده در اثر جوشش افزایش یافته است، روند ۵: سردشدگی سیال، روند ۶: باریک شدگی میانبارهای سیال، روند ۷: تراوش میانبارهای سیال طی گرمایش.

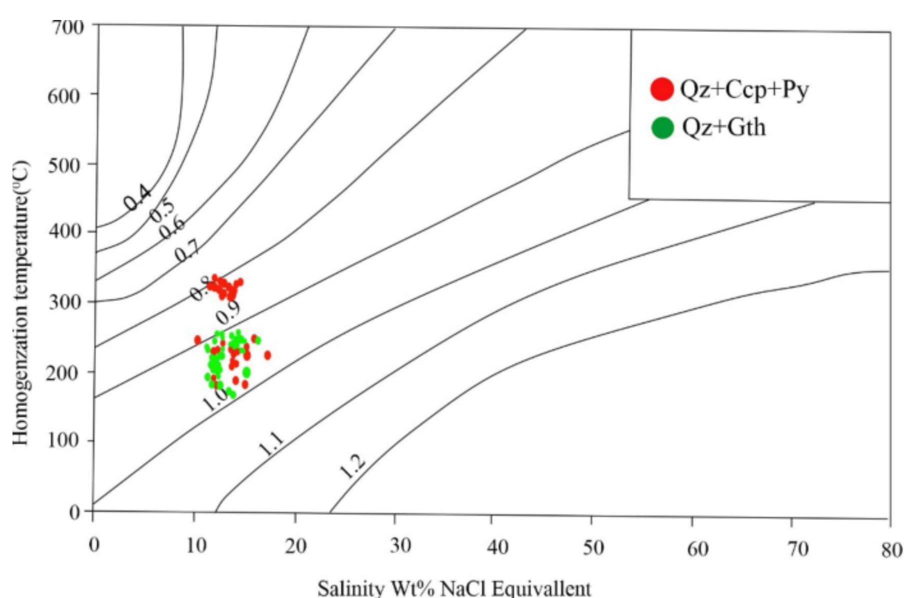
با توجه به اینکه تغییر چگالی در شناسایی سازوکار جریان سیال و تغییر مکانی آن در یک سامانه گرمابی بسیار مهم است، در منطقه مورد بررسی چگالی میانبار سیال نیز تعیین شد. برای این منظور، نمودار دمای همگن شدگی- شوری رسم گردید. بر پایه این نمودار به همراه خطوط پربندی با چگالی ثابت می‌توان چگالی سیال را تعیین کرد [۲۳]. بر این اساس، میانبارهای سیال منطقه دارای چگالی ۰٫۸۳ تا ۰٫۹۹ گرم بر سانتیمتر مکعب بوده و بیشترین فراوانی حدود ۰٫۹۳ گرم بر سانتیمتر مکعب است. به باور ویلکینسون [۲۴]، سردشدگی اهمیت چندانی در ته‌نشست مقادیر قابل‌توجهی از مواد معدنی در حجمی از سنگ، به سبب نبود شیب زمین‌گرمایی زیاد در محیط‌های پوسته‌ای ندارد. با این وجود، چنان که در شکل دیده می‌شود، کاهش دمای همگن‌شدگی از ۳۵۰ به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، سبب افزایش چگالی سامانه از ۰٫۸ به ۱٫۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب، کاهش سرعت سیال کانسنگ ساز و در پایان تمرکز و نهشت ماده معدنی می‌شود. تغییرات دمایی به علت دور شدن سیال‌ها از مرکز سامانه، کاتالیزه شدن آن‌ها در مسیرهای گسل، مخلوط شدن با آب‌های سرد جوی و رقیق شدن است. روندهای سردشدگی و رقیق‌شدگی عمومی در این گستره نشان‌دهنده ورود آب سرد سطحی به درون سامانه بوده که سبب ایجاد حالت تلسکوپی در آن شده است. این پدیده با حضور میانبارهای سیال ثانویه با دماها و شوری پایین‌تر مشخص می‌شود (شکل ۹).

برای تعیین عمق و فشار کانی‌سازی سیاجک از داده‌های دما و شوری استفاده شد [۲۵]. بر پایه فشار و عمق سیال گرمابی می‌توان شرایط تشکیل کانسار و همچنین تکامل سیال گرمابی را درک کرد. براساس شکل ۱۰ و با توجه به گستره دمایی و شوری منطقه سیاجک، این کانی‌سازی در فشار ۱۰ تا ۲۰ مگاپاسکال و در عمق کمتر از یک کیلومتر (براساس فشار سنگ ایستایی) شکل گرفته است.

مدل کانی‌سازی

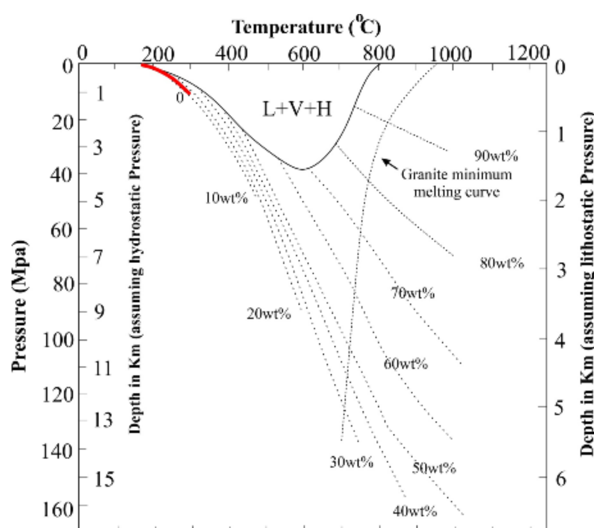
کانه‌زایی مس در منطقه اکتشافی سیاجک یک کانی‌سازی رگه-ای با کنترل ساختاری بوده که در سنگ‌های آمفیبولیت و برخوردگاه شیست آهکی و آمفیبولیت رخ داده است.

براساس گزارش پژوهشگرانی چون لکومبری-سانچز و همکاران [۲۶] و پیراجنو [۲۷]، آنچه در کنترل ناحیه‌ای موقعیت کانسارها در کانسارهای فراگرمایی نقش دارد، روند گسل‌های عمده و اثری است که آن‌ها بر ساختار کانسار دارند. البته بیشتر ذخایر معدنی بر روی این گسل‌ها قرار ندارند، بلکه در ارتباط با انشعاب‌ها و شاخه‌های فرعی گسل‌های اصلی هستند. کانی‌زایی در منطقه سیاجک دارای کنترل ساختاری است. بنابراین سن رگه‌های کانی‌سازی جوان‌تر از سن سنگ میزبان است. در این منطقه، توده وابسته به کانی‌سازی شناسایی نشد که به احتمال بسیار دلیل این امر قرار گرفتن توده‌های نفوذی در مناطق نیمه عمیق تا عمیق است.



شکل ۹: تغییرات دمایی و چگالی میانبارهای سیال در منطقه سیاجک براساس نمودار تعیین چگالی برای میان‌بارهای دو فازی غنی از مایع [۲۴].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.1.1]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.583]



شکل ۱۰ نمودار فشار- دمای نشان‌دهنده رابطه فازها در سامانه H_2O-NaCl در فشارهای هیدروایستایی و سنگ ایستایی [۲۵]، L = مایع، V =بخار، H = هالیت. خط‌چین‌ها پربندهای ثابت درصد وزنی NaCl محلول در شورابه هستند. خط باریک خاکستری منحنی کمترین ذوب گرانیت را مشخص می‌کند. خط ضخیم مشکی مرز سه فازی، L+V+H را برای سامانه NaCl-KCl-H_2O با Na/K در محلول ثابت شده بوسیله آلبیت و فلدسپار قلیایی در دماهای مشخص نشان می‌دهد.

بر پایه نمودار شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال، سردشدگی سیال ناشی از کاهش دما مهم‌ترین عامل کانی‌سازی است. افت دما نیز سبب ناپایداری مجموعه‌های حمل‌کننده عناصر و ته‌نشست کانی‌ها می‌شود و نبود فاز جامد (هالیت) در میانبارهای سیال به دلیل شوری متوسط تا پایین سیال‌های کانه‌ساز است. همچنین شواهد سنگ نگاری برای فرآیند جوشش دیده نگردید. براساس نظر برخی پژوهشگران [۲۸،۲۷]، شواهدی چون دما و شوری کم محلول کانه‌دار، کنترل ساختاری کانی‌سازی، نوع دگرسانی و گسترش آن در لبه رگه- رگچه‌ای و کانی‌شناسی ساده در منطقه نشانه‌های سامانه‌های رگه‌ای فراماگمایی هستند.

در جدول ۲، برخی از ویژگی‌های کانی سازی مس در منطقه اکتشافی سیاجک با دیگر کانسارهای مشابه از نقاط مختلف ایران چون مس حاتم‌آباد در شمال‌شرق قائن [۲۹]، مس چهل کوره در زاهدان [۴] و مس مشکان در شمال شرق سبزوار [۳۰] مقایسه شده است. سنگ میزبان کانی سازی در منطقه اکتشافی دگرگونی بوده که متفاوت‌تر بقیه است، زیرا بیشتر ذخایر رگه‌ای و فراگرمایی مس‌دار در سنگ میزبان آتشفشانی دیده می‌شوند. در کانسارهای رگه‌ای مقایسه شده، انواع دگرسانی‌ها تا حدی مشابه هستند و کانی‌شناسی در آن‌ها ساده است. دما و شوری تشکیل منطقه اکتشافی سیاجک مشابه کانسار مس مشکان است. مقدار عنصر مس در همه این کانسارها بیش از ۲ درصد است.

جدول ۲ مقایسه برخی از ویژگی‌های کانی سازی مس در منطقه اکتشافی سیاجک با دیگر کانسارهای مشابه از نقاط مختلف ایران.

نام کانسار	سنگ میزبان	کانی‌شناسی	دگرسانی	دمای تشکیل (°C)	مقدار شوری (٪)	بیشینه مقدار عنصر مس (٪)	مرجع
مس چهل کوره	ماسه‌سنگ تیره، شیل و لای سنگ	پیریت، پیروتیت، کالکوپیریت	سیلیسی، کربناتی، کلریتی	۳۳۰ تا ۴۸۲	۱ تا ۱۵	۱	۴
مس مشکان	ماسه‌سنگ آهکی	پیریت، کالکوسیت، بورنیت	سیلیسی، به‌صورت محدود کربناتی و پروپلتی	۱۷۰ تا ۲۴۰	۱۰٫۷ تا ۱۵٫۲	۴٫۶	۲۷
مس سنگان	رسوب‌های دگرگون‌شده	کالکوپیریت، پیریت	سیلیسی	۲۷۴ تا ۳۱۸	۷٫۳ تا ۱۱٫۴	۵	۲۸
مس سیاجک	آمفیبولیت	پیریت، کالکوپیریت	پروپلتیک، سیلیسی	۱۶۳ تا ۳۰۰	۱۰ تا ۱۳٫۵	۳٫۲	این پژوهش

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.1.1]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.583]

برداشت

رخداد کانه‌زایی مس و طلا سیاجک به‌صورت رگه-رگچه‌ای در سامانه گسلی با راستای شمال‌غرب-جنوب شرق و شمال‌شرق-جنوب‌غرب در سنگ میزبان آمفیبولیت دیده می‌شود. کانه‌های سولفیدی اولیه در بخش‌های سطحی به کانی‌های ثانویه مس شامل کوولیت، کالکوسیت، مالاکیت، آزوریت، مالاکیت و همچنین اکسیدها و هیدروکسیدی آهن چون گوتیت، هماتیت و لیمونیت تبدیل شده‌اند. دگرسانی در منطقه مورد بررسی شامل دو بخش است. سیلیسی شدن مهم‌ترین دگرسانی موجود در لبه رگه بوده که محدود به پیرامون رگه است. دگرسانی پروپلیتی به‌صورت ناحیه‌ای است که گسترش قابل‌توجهی در منطقه اکتشافی دارد. براساس نتایج تجزیه زمین‌شیمی نمونه-های برداشت شده از محل رگه‌ها، بالاترین مقدار مس ۳/۲ درصد، سرب ۲۱۸ گرم در تن، روی ۱۵۰ گرم در تن و طلا ۱۷۴ میلی‌گرم در تن است. مس عنصر اصلی و اقتصادی کانسار است. براساس نتایج ریزدماسنجی سیال‌های درگیر اولیه مشخص شد که محلول کانه دار دمای متوسط و شوری به نسبت پایین داشته است. نمودار دمای همگن‌شدگی نسبت به شوری شاره‌های درگیر اولیه کوارتز نشان داد که کاهش دما و همچنین فرایندهای سرد شدن و سرانجام شکل‌گیری رگه‌ها مؤثر بوده است. در منطقه مورد نظر، مجموعه بی‌سولفیدی نقش اصلی را در حمل و ته‌نشست مس و طلا دارد. براساس دما و شوری کم میانبارهای سیال، کنترل ساختاری کانی‌سازی، نوع دگرسانی و گسترش آن و کانی‌شناسی ساده ذخیره به احتمال بسیار این نوع کانی‌سازی از نوع فراگرمایی است که پتانسیل بالایی از مس را نشان می‌دهد. براساس بررسی های انجام شده در این منطقه توده در ارتباط با کانی‌سازی دیده نشد. با توجه به شواهد بیان شده، کانی‌سازی سیاجک را می-توان یک کانی‌سازی رگه‌ای از نوع مس-طلا فراگرمایی معرفی کرد. همچنین با توجه به نهشته‌های مس پیرامون منطقه، این رگه‌ها به احتمال بسیار وابسته به فعالیت‌های ماگمایی-گرمابی نهبندان-خاش هستند. شناسایی هر چه بیشتر این منطقه از نظر چگونگی تشکیل، منها محلول کانه‌دار و ساختارهای زمین-شناسی می‌تواند گام مثبتی برای پی‌جویی بهتر آن باشد.

قدردانی

این مقاله مربوط به طرح پژوهشی شماره ۳ با کد ۳/۵۴۱۹۰ مورخ ۱۳۹۹/۱۲/۱۶ است که با حمایت معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. از جناب آقای مهندس محمدی که اطلاعات و منطقه را در اختیارمان قرار دادند و جناب آقای مهندس محرم‌زاده که در بخش عملیات صحرایی ما را یاری نمودند صمیمانه سپاسگزاریم.

مراجع

[1] Tirrul R., Bell IR., Griffis R.J., Camp VE, " *The Sistan suture zone of eastern Iran"*, Geological Society of America Bulletin 94 (1983) 134-150.

[2] Camp V. E., Griffis R. J., *"Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone"*, eastern Iran. Lithos 15 (1982) 221-239.

[3] Aghanabati S. A., *"Geology of Iran (in Persian)"*, Geological Survey of Iran, Tehran (2004) 586p.

[4] Maanijo M., " *Geochemistry, Understanding the Origin of Mineralizing Fluids and the Formation of* Chehel koureh Copper Ore (Northwest of Zahedan) (in Persian)", PhD Thesis, Shahid Beheshti University (2007).

[5] Niknam Sh., Bomeri M., Biyabangard H., Nahtayi, A., *"Identification of alteration zones in Lonca region using telemetry methods (in Persian)"*, Iranian Economic Geological Society Conference (2015).

[6] Mokhtari Z., Boumari M., Bagheri S., " *Investigation of porphyry gold and copper mineralization using petrographic evidence and alteration in Siah Jangal region, north of Taftan mountain (in Persian)"*, southeast of Iran, 6th conference of Iranian Economic Geological Society (2014) 32-56.

[7] Noura A., " *Alteration Zones and Economic Geology of Kharestan Region in Relation to Copper and Gold Mineralization (in Persian)"*, M.Sc. Thesis, Azad University (2007).

[8] Moradi R., bomeri M., Bagheri S., Zahedi A., *"Determination of physicochemical conditions and controlling factors of mineralization using mineralogy, paragenetic relations and fluid loads*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.1.1]

[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.583]

[18] Lecumberri-Sanchez P., Steele-MacInnis M., Bodnar R. J., *“A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance"*, Geochimica et Cosmochimica
Acta 92 (2012) 14-22.

[19] Whitney, D.L., Evans, B.W., *"Abbreviations for names of rock-forming minerals"*, American Mineralogist 95 (2010) 185-187.

[20] Hajalilou B., Aghazadeh, M., *“Geological, Alteration and Mineralization Characteristics of Ali Javad Porphyry Cu-Au Deposit, Arasbaran Zone, NW Iran"*, Open Journal of Geology 6 (2016) 859-874.

[21] Shepherd R. G., *“Regression analysis of river profiles"*, The Journal of Geology 93 (1985) 377-384.

[22] Seward T. M., *"Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solutions"*, Geochimica et Cosmochimica Acta 37 (1973) 379-399.

[23] Bodnar R. J., *“A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and PVTX properties of inclusion fluids"*, Economic Geology 78 (1983) 535-542.

[24] Wilkinson J.J., *“Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits"*, Lithos 55(2001) 229-272

[25] Fournier, R.O., *“Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment"*, Economic Geology 94 (1996) 1193-1212.

[26] Camprubí A., Albinson T., *" Epithermal deposits in México—Update of current knowledge, and an empirical reclassification"*, Geology of Mexico: Celebrating the centenary of the Geological Society of Mexico 422 (2007) 377-401.

[27] Pirajno F., *“Hydrothermal processes and wall rock alteration In Hydrothermal processes and mineral systems"*, Springer, Dordrecht (2006).

[28] Sillitoe R. H., *"Epithermal models—genetic types, geometric controls and shallow features: Geological Association of Canada Special",* (2007) 40p.

[29] Moradi Navekh M., Malekzadeh Shafaroodi A., Javidi Moghadam M., *"Geology, Mineralogy, in Stibnite-Shorchah gold deposit, southeast of Zahedan (in Persian)"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 23 (2015) 121-134.

[9] Delavari M., Amini S., Sakani A., *"Geochemistry and tectonic-magmatic origin of Tertiary igneous rocks in the east and northeast of Nehbandan, eastern Iran (in Persian)"*, Journal of Earth Sciences 90 (2013) 98-121.

[10] Mirblochezhi H., Biabangard H., Bomeri M., *" Petrology, geochemistry and origin of granite rocks of Garagheh mountain, northwest of Zahedan (in Persian)"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 29 (2021) 237-248.

[11] Moradi R., bomeri M., Bagheri, S., *“Investigation of Apatite Chemistry in Azarin Lar Complex, North of Zahedan (in Persian)"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (2019) 281-298.

[12] Berberian, M., *“Iranian Geological Survey (in Persian)"*, Ministry of Mines and Metals Publications, Tehran (1981) 376p.

[13] Zarrinkoub M. H., Pang K. N., Chung S. L., Khatib M. M., Mohammadi S. S., Chiu H. Y., Lee, H. Y., *" Zircon U–Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran"*, Lithos 154 (2012) 392-405.

[14] Berberian M., *"The southern Caspian: a compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust"*, Canadian Journal of Earth Sciences 20 (1983) 163-183.

[15] Alavi Naini M. Lotfi, M., *" Geological Nehbandan Map 1:100000. No. E 8053. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran"*, Semat Publicher, Tehran (1991) 231p.

[16] Reyre D., Mohafez, S., *"A first contribution of the NIOC-ERAP agreements to the knowledge of Iranian geology"*, Paris: Editions Technip (1972) 58p.

[17] Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., & Bodnar R. J., *" Short note: HokieFlincs_H2O-NaCl: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H2O-NaCl"*, Computers & Geosciences, 49 (2012) 334-337.

Mineralogy of Skarn and Mineral and Geochemical Zones of Sanjadak II and III Exploration Zones, East of Sangan Khaf Iron Ore Mine", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 24 (2016) 343-354.

Geochemistry and Investigation of Fluids in Meshkan Exploration Zone, Northeast of Sabzevar", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 28 (2021) 883-894.

[30] Shakotdpour Z., Karimpour M., Malekzadeh Shafaroodi A., " *Geology, Mineralization,*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.4.1.1]

[DOI: 10.52547/ijcm.30.4.583]